

<b>Titre:</b> Title:	Contrôle en temperature d'un four cylindrique à trois zones de chauffe
<b>Auteurs:</b> Authors:	Ludovic Blanc et Vincent Rimbault
<b>Date:</b>	2003
<b>Type:</b>	Rapport / Report
<b>Référence:</b> Citation:	Blanc, Ludovic et Rimbault, Vincent (2003). Contrôle en température d'un four cylindrique à trois zones de chauffe. Rapport technique. EMP-RT-2003-09

**Document en libre accès dans PolyPublie**

Open Access document in PolyPublie

<b>URL de PolyPublie:</b> PolyPublie URL:	<a href="http://publications.polymtl.ca/2611/">http://publications.polymtl.ca/2611/</a>
<b>Version:</b>	Version officielle de l'éditeur / Published version Non révisé par les pairs / Unrefereed
<b>Conditions d'utilisation:</b> Terms of Use:	Autre / Other

**Document publié chez l'éditeur officiel**

Document issued by the official publisher

<b>Maison d'édition:</b> Publisher:	École Polytechnique de Montréal
<b>URL officiel:</b> Official URL:	<a href="http://publications.polymtl.ca/2611/">http://publications.polymtl.ca/2611/</a>
<b>Mention légale:</b> Legal notice:	Tous droits réservés / All rights reserved

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie,  
le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**This file has been downloaded from PolyPublie, the  
institutional repository of Polytechnique Montréal<http://publications.polymtl.ca>

EPM-RT-2003-09

## CONTRÔLE EN TEMPÉRATURE D'UN FOUR CYLINDRIQUE À TROIS ZONES DE CHAUFFE

Ludovic Blanc, Vincent Raimbault  
Département de génie électrique  
École Polytechnique de Montréal

Août 2003

Poly



EMP-RT-2003-09

# CONTRÔLE EN TEMPÉRATURE D'UN FOUR CYLINDRIQUE À TROIS ZONES DE CHAUFFE

Ludovic Blanc  
Vincent Raimbault  
Département de Génie électrique...  
École Polytechnique de Montréal

Projet dirigé par

Professeur Frank Ajersch, DGC  
Professeur Romano De Santis, DGE

Août 2003

---

©2003  
Frank Ajersch et Romano DeSantis  
Tous droits réservés

Dépôt légal :  
Bibliothèque nationale du Québec, 2002  
Bibliothèque nationale du Canada, 2002

EPM-RT-2003-09

*Contrôle en température d'un four cylindrique à trois zones de chauffe*

par : Ludovic Blanc, et Vincent Raimbault

Département de génie électrique.

École Polytechnique de Montréal

Toute reproduction de ce document à des fins d'étude personnelle ou de recherche est autorisée à la condition que la citation ci-dessus y soit mentionnée.

Tout autre usage doit faire l'objet d'une autorisation écrite des auteurs. Les demandes peuvent être adressées directement aux auteurs (consulter le bottin sur le site <http://www.polymtl.ca/>) ou par l'entremise de la Bibliothèque :

École Polytechnique de Montréal  
Bibliothèque – Service de fourniture de documents  
Case postale 6079, Succursale «Centre-Ville»  
Montréal (Québec)  
Canada H3C 3A7

Téléphone :	(514) 340-4846
Télécopie :	(514) 340-4026
Courrier électronique :	<a href="mailto:biblio.sfd@polymtl.ca">biblio.sfd@polymtl.ca</a>

---

Pour se procurer une copie de ce rapport, s'adresser à la Bibliothèque de l'École Polytechnique.

Prix : 25.00\$ (sujet à changement sans préavis)

Régler par chèque ou mandat-poste au nom de l'École Polytechnique de Montréal.

Toute commande doit être accompagnée d'un paiement sauf en cas d'entente préalable avec des établissements d'enseignement, des sociétés et des organismes canadiens.

## Remerciements

Dans le cadre de notre stage de fin d'études d'ingénieur, nous avons bénéficié d'un merveilleux accueil et soutien de la part de l'ensemble des personnes avec qui nous avons été en contact à l'École Polytechnique de Montréal. Nous tenons en particulier à faire part de notre grande reconnaissance aux techniciens de la section Automation et Systèmes, Madame Marie-Lyne Brisson et Monsieur Richard Grenier, pour la qualité du soutien technique et informatique qu'ils nous ont fourni tout au long de notre projet. Nous remercions également Monsieur Cédric Demers-Roy pour ses conseils avisés sur la toolbox xPCTarget et Monsieur Faouzi Messaoud pour avoir mis à notre disposition en d'aussi bonnes conditions le four qu'il utilise dans le cadre de son projet de doctorat.

Nous apportons également nos sincères remerciements à Madame Maria David et Monsieur De Fornel, professeurs au département de Génie Électrique et Automatique de l'ENSEEIH, pour leurs précieux conseils dans le cadre de notre échange étudiant à l'École Polytechnique de Montréal. Enfin, nous souhaitons, tout particulièrement, remercier nos familles et nos proches pour leur soutien et leurs encouragements.

Cette recherche a bénéficié d'un support financier de la part du Conseil National des Recherches en Sciences Naturelles et du Génie du Canada.

# CONTRÔLE EN TEMPÉRATURE D'UN FOUR CYLINDRIQUE À TROIS ZONES DE CHAUFFE

Ludovic Blanc

Stagiaire de l'ENSEEIHT (Toulouse, France)

Vincent Raimbault

Stagiaire de l'ENSEEIHT (Toulouse, France)

École Polytechnique de Montréal

Laboratoire d'Automation et Systèmes

2900, Boulevard Edouard-Montpetit, CP 6079 Succursale Centre Ville

Montréal, Québec, Canada, H3C3A7

## Sommaire

Cette étude présente une démarche systématique que nous avons mis en place pour le contrôle en température d'un four cylindrique à trois zones de chauffe. Son objectif est de valider de façon expérimentale et dans le cas particulier d'un système physique présentant un retard important, la pertinence d'une nouvelle procédure qui a été récemment développée au sein de notre groupe pour régler les gains d'un contrôleur de type Proportionnel Intégral Dérivé (PID) appartenant à la famille PID « Dual Loop ».

Cet objectif est poursuivi en développant un banc d'essai convenablement instrumenté et en effectuant un certain nombre d'essais expérimentaux appropriés. Le banc d'essai est constitué d'un four du département de Génie Chimique de l'École Polytechnique de Montréal dédié à l'élaboration de nouveaux alliages, pour la partie opérative et d'un environnement informatique temps réel conçu sous Matlab, Simulink et xPC Target, pour la commande. Les essais concernent le contrôle de la température au sein du creuset afin d'atteindre une température homogène de 500°C.

Les résultats obtenus illustrent d'une façon claire autant les modalités de mécanisation que l'efficacité d'implantation de la procédure de réglage en étude.

## Table des matières

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>1</b>
<b>SOMMAIRE .....</b>	<b>2</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>6</b>
<b>1 DESCRIPTION DE LA PARTIE OPÉRATIVE DU BANC D'ESSAI.....</b>	<b>7</b>
1.1 LE FOUR .....	7
1.2 LES ACTIONNEURS ÉLECTRIQUES .....	8
1.3 LES CAPTEURS DE TEMPÉRATURE.....	9
1.4 LE FOUR EN OPÉRATION .....	10
<b>2 INTERFACE ENTRE LES PARTIES OPÉRATIVES ET COMMANDES.....</b>	<b>11</b>
2.1 LECTURE DES CAPTEURS DE TEMPÉRATURE .....	11
2.2 COMMANDE DES RELAIS.....	13
<b>3 DESCRIPTION DE LA PARTIE COMMANDE DU BANC D'ESSAI .....</b>	<b>16</b>
3.1 ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE .....	16
3.2 STRUCTURE DU CONTRÔLE EN TEMPÉRATURE.....	18
3.3 IMPLANTATION AVEC xPCTARGET .....	20
<b>4 PROCÉDURE DE RÉGLAGE DES CONTRÔLEURS .....</b>	<b>21</b>
4.1 POINT DE FONCTIONNEMENT .....	21
4.2 ESSAI EN BOUCLE OUVERTE SUR LA TEMPÉRATURE MOYENNE.....	21
4.3 RÉGLAGE DU CONTRÔLEUR SUR LA MOYENNE .....	24
4.4 RÉGLAGE DU CONTRÔLEUR SUR L'ÉCART .....	26
<b>5 MISE EN OEUVRE EXPÉRIMENTALE ET RÉSULTATS.....</b>	<b>27</b>
5.1 CONTRÔLEUR SUR LA MOYENNE .....	27
5.2 CONTRÔLEUR SUR L'ÉCART .....	35
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>37</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>38</b>



## Table des figures

FIGURE 1.1: FOUR OUVERT.....	7
FIGURE 1.2 : CONVERTISSEURS STATIQUES .....	8
FIGURE 1.3 : INSERTION DES THERMOCOUPLES DANS LE CREUSET .....	9
FIGURE 1.4 : LE FOUR EN OPERATION .....	10
FIGURE 2.1: SCHÉMA DE BRANCHEMENT D'UN THERMOCOUPLE .....	11
FIGURE 2.2 : CIRCUIT ÉQUIVALENT AU BRANCHEMENT DU THERMOCOUPLE .....	12
FIGURE 2.3 : MISE EN FORME DU SIGNAL DE MESURE DE TEMPÉRATURE PAR LE PROGRAMME .....	12
FIGURE 2.4 : SCHÉMA DE COMMANDE DU RELAIS .....	13
FIGURE 2.5 : REPRÉSENTATION TEMPORELLE DES DIVERS SIGNAUX POUR $N=8$ ET $\Phi=0$ .....	15
FIGURE 3.1 : ARCHITECTURE MATÉRIELLE ET LOGICIELLE DU DISPOSITIF DE CONTRÔLE .....	17
FIGURE 3.2 : SCHÉMA DE PRINCIPE DU CONTRÔLEUR .....	18
FIGURE 3.3 : ARCHITECTURE GÉNÉRALE DU BANC D'ESSAI .....	19
FIGURE 3.4 : PREMIER NIVEAU DU MODULE SIMULINK UTILISÉ POUR LE CONTRÔLE EN TEMPÉRATURE.....	20
FIGURE 4.1: ESSAI EN BOUCLE OUVERTE SUR LA MOYENNE .....	22
FIGURE 4.2: COMPARAISON COMPORTEMENT RÉEL ET MODÈLE SIMULÉE EN BOUCLE OUVERTE .....	23
FIGURE 4.3 : STRUCTURE DU CONTRÔLEUR PID-DL .....	24
FIGURE 4.4 : STRUCTURE DU CONTRÔLEUR PI SUR L'ÉCART.....	26
FIGURE 5.1: CONTRAINTES IMPOSÉES SUR LA RÉPONSE À L'ÉCHELON À L'AIDE DU BLOC NCD.....	28
FIGURE 5.2: COMPARAISON RÉPONSE RÉELLE ET SIMULÉE AVEC $K_1=0.0025$ .....	28
FIGURE 5.3: COMPARAISON RÉPONSE RÉELLE ET SIMULÉE AVEC $K_1=0.004$ .....	29
FIGURE 5.4: COMPARAISON DE LA RÉPONSE DU MODÈLE ET DE LA RÉPONSE RÉELLE .....	31
FIGURE 5.5 : COMPARAISON DU COMPORTEMENT EXPÉRIMENTAL DE LA MOYENNE EN FONCTION DE $K_5$ .....	31
FIGURE 5.6: COMPARAISON DU COMPORTEMENT SIMULÉ DE LA MOYENNE EN FONCTION DE $K_5$ .....	32
FIGURE 5.7 : ESSAI EN BOUCLE FERMÉE AVEC $K_5=0,5 \cdot 10^{-6}$ .....	32
FIGURE 5.8 : ESSAI EN BOUCLE FERMÉE AVEC $K_5=1 \cdot 10^{-6}$ .....	32
FIGURE 5.9 : ESSAI EN BOUCLE FERMÉE AVEC $K_5=1,25 \cdot 10^{-6}$ .....	33
FIGURE 5.10 : ESSAI EN BOUCLE FERMÉE AVEC $K_5=1,5 \cdot 10^{-6}$ .....	33
FIGURE 5.11: ESSAI DU CONTRÔLEUR SUR LA MOYENNE EN MODE OPÉRATOIRE NORMAL .....	34
FIGURE 5.12 : ÉCART ENTRE LES TEMPÉRATURES HAUTES ET BASSES EN MODE OPÉRATOIRE NORMAL.....	34
FIGURE 5.13 : ESSAI DU CORRECTEUR PI SUR L'ÉCART DE TEMPÉRATURE ( $K_p=0,05$ ET $K_i=1 \cdot 10^{-5}$ ) .....	35
FIGURE 5.14 : ÉCART ENTRE LES TEMPÉRATURES HAUTES ET BASSES APRÈS CORRECTION SUR L'ÉCART.....	36

## **Glossaire**

<b>PI</b>	Correcteur Proportionnel Intégral
<b>PID</b>	Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé
<b>PID-DL</b>	Correcteur Proportionnel Intégral Dérivé avec boucle de rétroaction Dual Loop [1-5]
<b>A/D</b>	Conversion Analogique à Digitale
<b>D/A</b>	Conversion Digitale à Analogique
<b>SISO</b>	Single Input Single Output : Système à une entrée et une sortie

## Introduction

Ce rapport fait partie d'un ensemble d'études menées au sein de la section Automation et Systèmes sur la validation expérimentale de la procédure de réglage d'un contrôleur *PID Dual Loop* [1]. Dans des travaux précédents l'application d'une telle procédure a été explorée dans le cadre d'un système électromécanique (contrôle de position, contrôle de vitesse [2, 3]) et dans le cadre d'un système hydraulique (contrôle de niveau dans un bac d'alimentation, contrôle de débit [4, 5]). Dans cette étude nous explorons l'application de cette procédure dans le cadre d'un système constitué d'un four cylindrique à trois zones de chauffe. Le problème est de contrôler avec précision la température interne du creuset placé au cœur du four. La nouveauté par rapport aux études déjà mentionnées, est représentée par le contrôle d'un système asservi dont le comportement dynamique est caractérisé par un retard important entre l'action de contrôle et la variable contrôlée.

Le banc d'essai mis en place est composé d'une partie opérative incluant le four ainsi que ses actionneurs électriques et ses capteurs, et d'une partie commande basée sur une architecture PC permettant l'implantation du contrôle de température en temps réel. L'architecture matérielle et logicielle mise en œuvre pour la partie commande, s'appuie sur un outil de prototypage rapide développé par la compagnie MathWorks sous le nom d'xPC Target [8-9]. Cet outil permet la conception et l'implantation temps réel aisées de lois de commande développées sous Matlab Simulink. La commande du four met également en œuvre la technique de modulation de largeur d'impulsion dans le cas particulier de la commande de relais.

La structure de contrôle en température élaborée repose sur la mise en œuvre du PID Dual Loop dont un certain nombre de tests viennent confirmer la pertinence dans le cadre de cette application. La procédure de réglage du contrôleur est présentée en détail et utilise notamment les outils modernes de simulation et d'optimisation offerts par Matlab. Ainsi, dans la mesure du possible, chacun des résultats expérimentaux exposés est confronté à la simulation.

# 1 Description de la partie opérative du banc d'essai

## 1.1 Le four

Le four cylindrique considéré, d'une puissance de 3 kW, appartient au département de Génie Chimique de l'École Polytechnique de Montréal. Ce type de four est utilisé

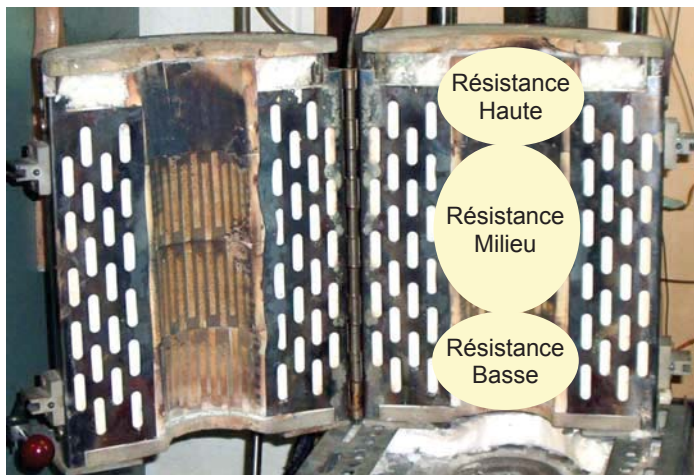


Figure 1.1: Four ouvert

dans le cadre de travaux de recherche sur des alliages nécessitant l'obtention d'une température précise et homogène.

L'enceinte du four est fractionnée en trois zones de chauffe : Haut, Milieu et Bas. Les zones hautes et basses sont respectivement associées à une

résistance de chauffe haute et une résistance de chauffe basse. Chacune des résistances hautes et basses délivre une puissance maximale de 750 W. La zone de chauffe du milieu se compose quant à elle, de deux résistances connectées en parallèle. La résistance milieu équivalente délivre ainsi une puissance maximale de 1500 W. La *figure 1.1* identifie les trois zones de chauffe du four ainsi que leurs résistances respectives.

Les caractéristiques techniques du four sont regroupées dans la *table 1.1*.

Fabricant	SATEC SYSTEMS
Type / Modèle	KANTHAL-A1 / SF16
Puissance Maximale	3000 W

Table 1.1 : Caractéristiques du four

## 1.2 Les actionneurs électriques

L'alimentation du four représentée sur la *figure 1.2*, se compose de trois convertisseurs statiques alimentés à partir d'une phase du réseau électrique 110V, 60Hz. Chacun des trois convertisseurs est associé en série à une des trois résistances de chauffe. La tension de commande appliquée à l'entrée des relais permet de commander leur amorçage. Une fois un relais amorcé, la tension du réseau se retrouve aux bornes de la résistance correspondante et chauffe le four par effet Joule.

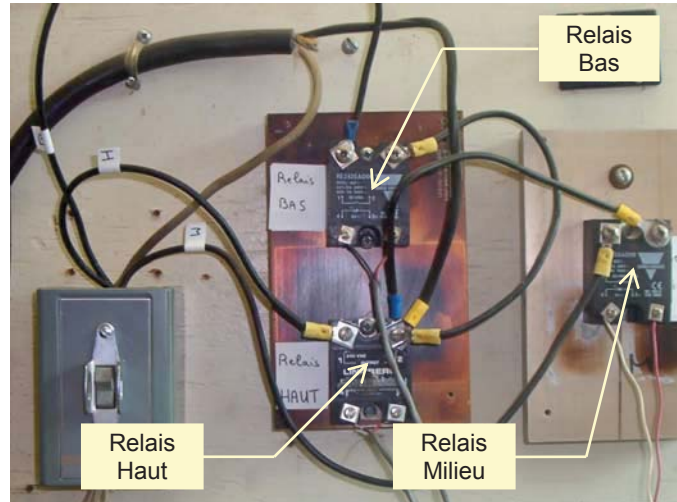


Figure 1.2 : Convertisseurs statiques

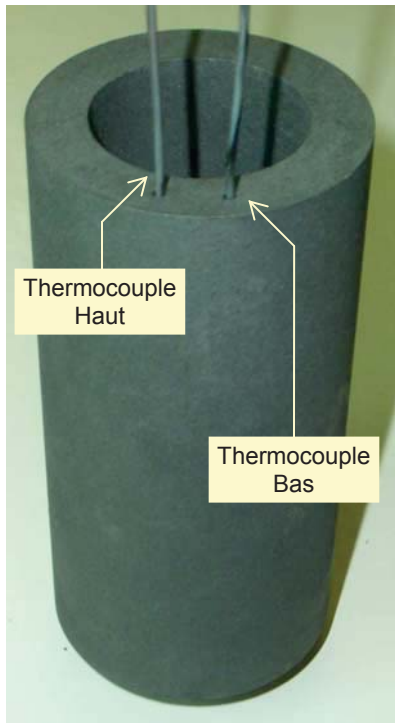
Les caractéristiques techniques des convertisseurs statiques sont résumées dans la *table 1.2*.

Relais	Haut	Milieu	Bas
Fabricant	LINDBERG	CARLO GAVAZZI	CARLO GAVAZZI
Type	Tout ou rien	Statique	Statique
Référence	Non spécifiée	RE 24025 AD06	RE 24025 AD06
Entrée	3,5-15 V	0-5 V	0-5 V

Table 1.2 : Caractéristiques des relais de l'alimentation

### 1.3 Les capteurs de température

Tel que représenté sur la *figure 1.3*, deux thermocouples sont insérés dans la paroi du creuset en graphite placé au cœur du four. Le premier est positionné dans le bas de la paroi du creuset tandis que le deuxième se situe dans le haut de la paroi. En effet, il est



important de disposer de deux points de mesure distincts car le creuset peut présenter une grande différence de température entre le haut et le bas. Ainsi, la disposition des thermocouples permet d'obtenir une image de la répartition de température au sein du creuset. Le contrôle de l'homogénéité de la température ainsi que de sa précision constituent un élément important pour la qualité des essais.

*Figure 1.3 : Insertion des thermocouples dans le creuset*

Les caractéristiques des deux thermocouples employés sont données dans la *table 1.3*.

Fabricant	OMEGA
Type	K
Matériaux	Nickel-Chromium Vs Nickel Aluminium
Plage de température maximale	-200°C à 1250°C

*Table 1.3 : Caractéristiques des thermocouples*

## 1.4 Le four en opération

En fonctionnement, le four est refermé sur un cylindre métallique englobant le creuset. Un mélange gazeux d'Argon et d'Hexafluorure de Soufre ( $Ar-SF_6$ ) est injecté à la base du cylindre métallique durant toute la période de chauffe. La circulation de ce mélange chasse l'air contenu dans le cylindre métallique et évite ainsi l'oxydation du creuset en graphite. Le haut du cylindre métallique est obstrué par un couvercle non hermétique laissant uniquement passé un agitateur et les deux thermocouples placés dans la paroi du creuset. La présence de pierres réfractaires ainsi que de laine de verre permet une meilleure isolation thermique du haut de l'enceinte du four. La *figure 1.4* représente le four en opération.



Figure 1.4 : Le four en opération

### Remarque :

L'écoulement permanent d'un gaz dans l'enceinte du four accentue les pertes de chaleur vers le haut de l'enceinte et donc la disparité de température entre le haut et le bas du creuset.



## 2 Interface entre les parties opératives et commandes

### 2.1 Lecture des capteurs de température

La figure 2.1 schématise le branchement d'un thermocouple de type K (Nickel-Aluminium / Nickel-Chromium) sur les bornes d'entrée d'une carte d'acquisition.

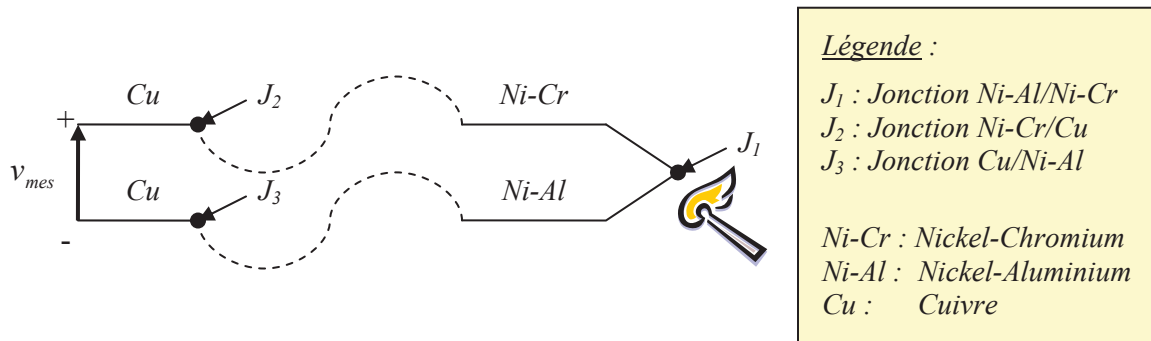


Figure 2.1: Schéma de branchement d'un thermocouple

Ce type de thermocouple délivre une tension  $v_{J_1}$  comprise entre 0 et 50 mV fonction de la température au niveau de la jonction  $J_1$ . L'image de la température  $T_{J_1}$  au niveau de la jonction est alors liée à la tension  $v_{J_1}$  suivant la relation polynomiale de l'équation 2.1 donnée par le manufacturier Omega [10] pour un thermocouple de type K.

$$T_{J_1} = f(v_{J_1}) = a_0 + a_1 v_{J_1} + a_2 v_{J_1}^2 + a_3 v_{J_1}^3 + a_4 v_{J_1}^4 + a_5 v_{J_1}^5 + a_6 v_{J_1}^6 + a_7 v_{J_1}^7 + a_8 v_{J_1}^8$$

$a_0$	0,226584602	$a_5$	$4,83506.10^{10}$
$a_1$	24152,109	$a_6$	$-1,18452.10^{12}$
$a_2$	67233,4248	$a_7$	$1,3869.10^{13}$
$a_3$	2210340,682	$a_8$	$-6,33708.10^{13}$
$a_4$	-860963914,9		

Equation 2.1: Relation  $T_{J_1}=f(v_{J_1})$

Néanmoins, la connexion des thermocouples au niveau des bornes d'entrées de la carte d'acquisition met en contact deux types de matériaux différents. Il en résulte la création d'une nouvelle jonction pour chaque connexion. Par conséquent, la température



ambiante étant non nulle, la tension mesurée  $v_{mes}$  au niveau du bornier de la carte d'acquisition est biaisée par l'introduction de deux nouvelles tensions. La *figure 2.2* présente le circuit équivalent au branchement du thermocouple et met en évidence les tensions introduites par les trois jonctions.

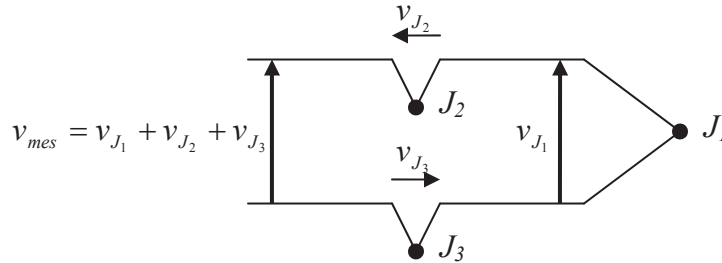


Figure 2.2 : Circuit équivalent au branchement du thermocouple

Finalement, il apparaît que la tension mesurée  $v_{mes}$  au niveau de la carte d'acquisition est entachée par l'adjonction des tensions  $v_{J2}$  et  $v_{J3}$  dues aux jonctions  $J_2$  et  $J_3$ . Ainsi, il est nécessaire de corriger la tension mesurée par un offset compensant  $v_{J2}$  et  $v_{J3}$ . La valeur de l'offset est déterminée manuellement par étalonnage du thermocouple à l'aide d'une température de référence. De plus, la mise en forme du signal de mesure du thermocouple nécessite la mise en place d'un filtre passe bas de façon à limiter l'influence des bruits en provenance de l'espace de travail. Dans le cadre de cette application, il a été adopté une pulsation de coupure de  $10 \text{ rad.s}^{-1}$ . Enfin, la relation polynomiale entre la température de jonction et la tension de jonction est appliquée au signal filtré. La *figure 2.3* résume la procédure de mise en forme du signal de mesure du thermocouple effectuée par le programme de contrôle.

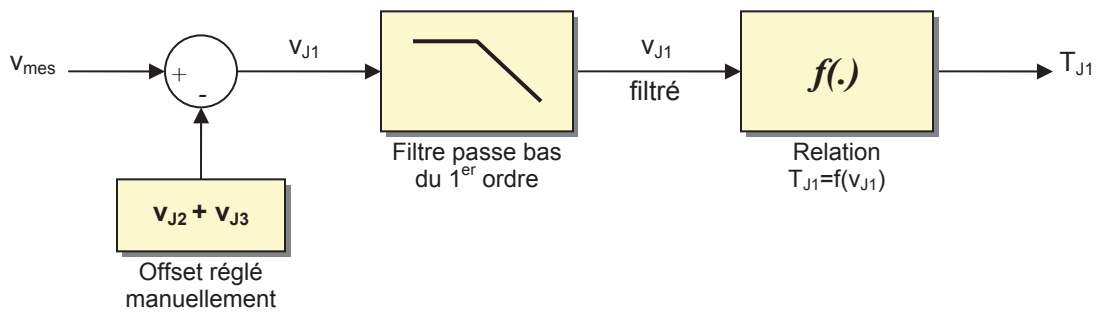


Figure 2.3 : Mise en forme du signal de mesure de température par le programme

## 2.2 Commande des relais

La figure 2.4 schématise la commande du relais d'une des trois résistances de chauffe équipant le four.

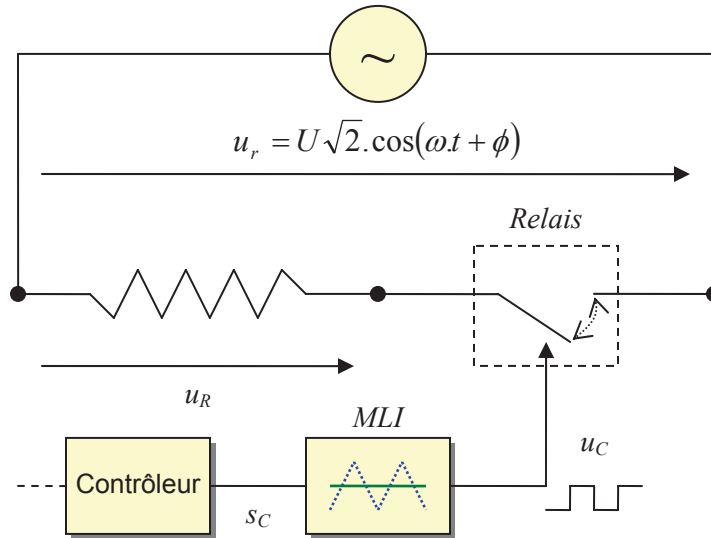


Figure 2.4 : Schéma de commande du relais

La tension de commande  $u_C$  appliquée au relais, permet de l'amorcer ou de le désamorcer. Ainsi, lorsque la tension  $u_C$  est à l'état haut, la tension réseau  $u_r$  est directement appliquée aux bornes de la résistance de chauffage. La puissance de chauffe est alors fournie au four par effet Joule. Inversement, lorsque la tension  $u_C$  est à l'état bas, la résistance de chauffage voit la tension  $u_r$  à ses bornes s'annuler et ne fournit, par conséquent, plus de puissance thermique.

Le comportement entrée-sortie des relais n'étant pas linéarisable, il serait impossible de commander directement et de façon linéaire la puissance fournie au four. Pour remédier à cet obstacle, il est mis en place une Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) de la tension de commande du relais. Ce dispositif s'intercale entre le contrôleur et le relais et, tel que le souligne la démonstration 2.1, permet de faire coïncider le pourcentage de la puissance moyenne fournie au four sur une période de modulation avec la sortie du contrôleur  $s_C$ . Ainsi, à l'échelle de la constante de temps du four de l'ordre de quelques minutes et comparativement à la période de modulation (cent fois plus grande

que la période réseau) de l'ordre de la seconde, le signal de commande  $s_C$  en sortie du contrôleur peut être considéré comme étant directement l'image du pourcentage de la puissance appliquée au four.

### Démonstration 2.1

#### ✓ Thèse

La sortie du contrôleur  $s_C$  coïncide avec le pourcentage de la puissance moyenne fournie au four sur une période de modulation  $T$ .

#### ✓ Hypothèses

On considère un signal triangulaire de modulation  $s_T$  de période  $T$ ,  $n$  fois plus grande que la période de la tension du réseau  $u_r$  ( $n$  entier). Lorsque le signal de commande  $s_C$  est supérieur au signal  $s_T$ , la tension de commande du relais  $u_C$  est à l'état haut et la tension réseau  $u_r$  (pleine onde) est appliquée aux bornes de la résistance de chauffage. Inversement, lorsque le signal  $s_C$  est inférieur au signal  $s_T$ ,  $u_C$  est à l'état bas et la tension  $u_R$  aux bornes de la résistance est nulle. La *figure 2.5* offre un aperçu des divers signaux dans le cas où  $n=8$  et un déphasage  $\phi=0$ .

#### ✓ Démonstration

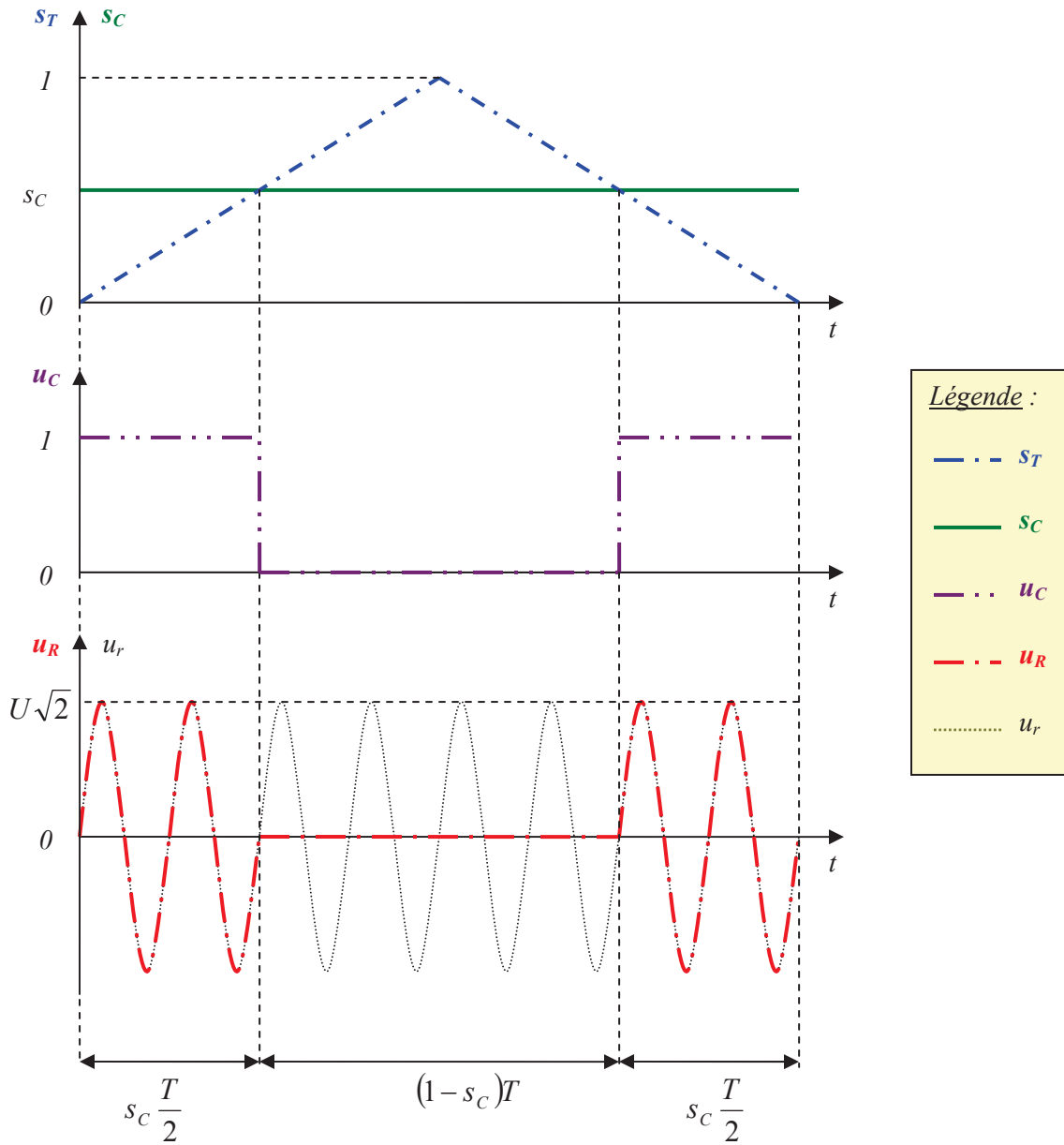
On note  $P$  la puissance moyenne sur la période  $T$ , dissipée par effet Joule au niveau de la résistance de chauffage,  $U$  la tension efficace fournie par le réseau et  $\phi$  son déphasage. On note également  $P_{max}$  la valeur maximale que peut prendre la puissance moyenne. On a finalement les relations suivantes :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{u_R^2}{R} dt = \frac{1}{RT} \left( \int_0^{s_C \frac{T}{2}} 2U^2 \cos^2 \left( \frac{2n\pi}{T} t + \phi \right) dt + 0 + \int_{(1-\frac{s_C}{2})T}^T 2U^2 \cos^2 \left( \frac{2n\pi}{T} t + \phi \right) dt \right)$$

$$P = \frac{U^2}{RT} \left( \int_0^{s_C \frac{T}{2}} \left( 1 + \cos \left( 2 \frac{2n\pi}{T} t + 2\phi \right) \right) dt + \int_{(1-\frac{s_C}{2})T}^T \left( 1 + \cos \left( 2 \frac{2n\pi}{T} t + 2\phi \right) \right) dt \right)$$

$$P = s_C \frac{U^2}{R} = s_C P_{max}$$

$$\text{Finalement, ce qu'il fallait démontré : } s_C = \frac{P}{P_{max}}$$


 Figure 2.5 : Représentation temporelle des divers signaux pour  $n=8$  et  $\Phi=0$ 

### Remarque :

Il est à noter que hors des limites de modulation  $[0 \ 1]$ , les variations du signal de commande  $s_C$  n'auront plus d'effets sur la puissance de chauffe fournie au four. En effet, le four ne peut pas fournir plus que sa puissance maximale tout comme il ne peut pas récupérer de la puissance de chauffe (puissance négative). Ainsi le système reste par nature non linéaire du fait de la présence de saturations.

### 3 Description de la partie commande du banc d'essai

#### 3.1 Architecture matérielle et logicielle

Le logiciel de contrôle de la température du four est développé avec la toolbox xPC Target de Matlab Simulink. En effet, xPC Target fournit les ressources logicielles nécessaires pour ouvrir Simulink à l'univers du contrôle en temps réel. La structure de contrôle mise en place est représentée sur la *figure 3.1* et repose sur l'architecture matérielle et logicielle suivante :

- **Un PC appelé hôte** : Permet le développement sous Simulink du programme de contrôle du four ainsi que l'interaction avec le système contrôlé (supervision, réglage des paramètres). Il est basé sur un PC Pentium avec 256 Mo de mémoire vive et est équipé des éléments particuliers suivants :
  - ✓ Matlab 6.5 avec Real Time Workshop
  - ✓ Simulink
  - ✓ xPCTarget 2
  - ✓ Microsoft Visual C++
  - ✓ Une carte Ethernet 3 COM Etherlink XL 10/100PCI TX NIC (3C905B-TX) avec Driver Microsoft Version 5.0.2195.0
- **Un PC appelé cible** : Fonctionne avec un noyau de calcul temps réel lui permettant d'exécuter le programme développé sur le PC hôte. Le PC cible est physiquement connecté au procédé à contrôler par le biais d'une carte PCI d'acquisition (A/D) et de commande (D/A). La précision des mesures effectuées nécessite une calibration régulière de cette carte [7]. Le PC basé sur un Pentium avec 256 Mo de mémoire vive est équipé des éléments particuliers suivants :
  - ✓ Une carte PCI 6025E de National Instruments (conversion A/D, D/A) [6]
  - ✓ Une disquette de démarrage spécifique
  - ✓ Une carte Ethernet Intel Pro 100S avec Driver I82559

- **Une liaison Ethernet :** La présence d'un routeur TCP/IP (hub) D-Link 5 ports 10/100 MBps Switch permet la communication entre le PC hôte et le PC cible. La liaison créée est non seulement utilisée pour charger sur la cible le programme de contrôle développé avec Simulink sur le PC hôte mais également pour interagir en permanence avec le PC cible et récupérer toutes les données enregistrées.

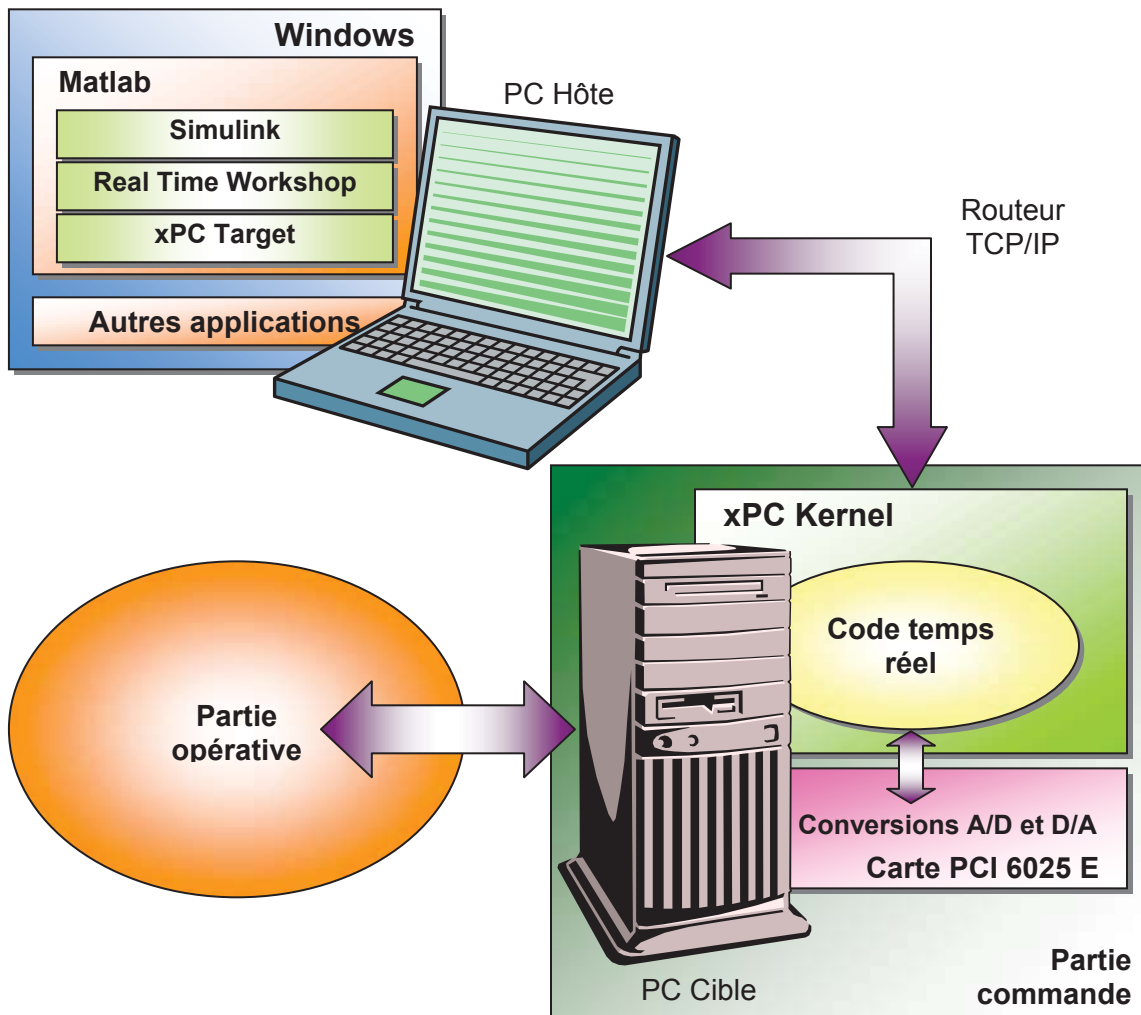


Figure 3.1 : Architecture matérielle et logicielle du dispositif de contrôle

### 3.2 Structure du contrôle en température

La structure du contrôle en température mise en place se distingue par ses deux niveaux de corrections. En effet, tel que présenté sur la *figure 3.2*, une première correction est tout d'abord apportée à partir de la température moyenne du creuset de façon à l'asservir à la consigne de température. Cette correction  $C_1$  est conçue sur la base d'un correcteur du type *PID-DL* développé par DeSantis [1-5] et dont la pertinence est à démontrer expérimentalement dans le cadre du système considéré. Elle se répartie de façon égale entre les relais du haut, du milieu et du bas si bien que le four peut être considéré comme un système *SISO* à une entrée (la température moyenne) et une sortie (la commande répartie sur les trois relais).

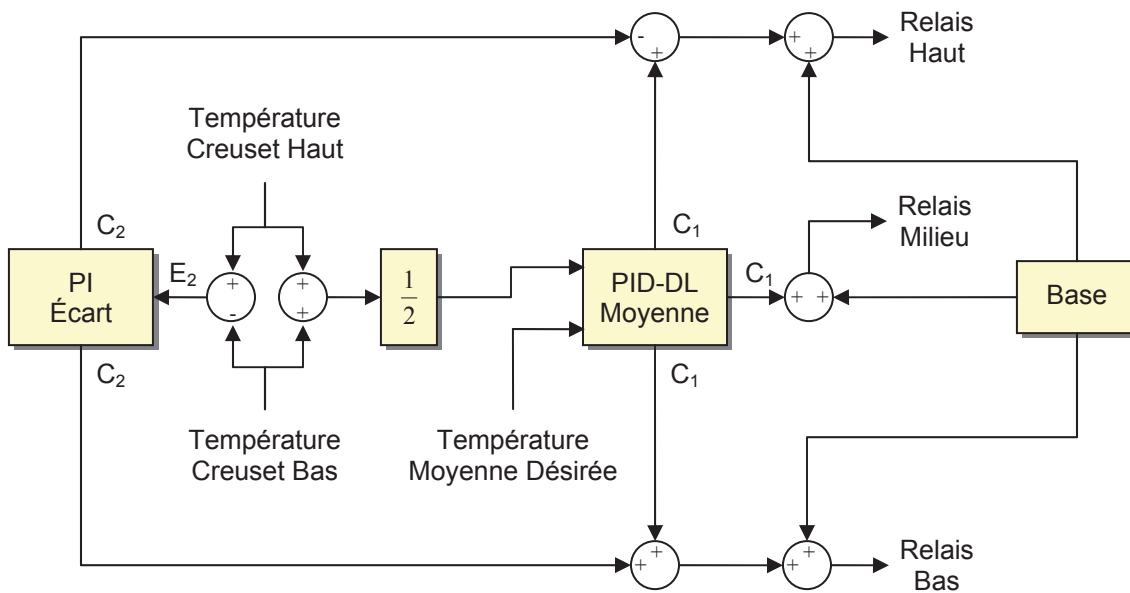


Figure 3.2 : Schéma de principe du Contrôleur

Une seconde correction  $C_2$  se charge de compenser l'écart de température ayant pu apparaître entre le haut et le bas du creuset en insérant en permanence sur la commande des relais une correction proportionnelle intégrale *PI* à partir de l'écart. Ainsi, lorsque le haut du creuset est plus chaud que le bas, l'écart de température est positif et la sortie du correcteur vient se soustraire à la commande du relais haut et s'additionner à celle du

relais bas. Le four va donc plus chauffer au niveau de la zone basse que de la haute et ainsi tendre à corriger l'écart de température.

De plus, tel qu'explicité au § 4.1, la nécessité de positionner le système à un point de fonctionnement précis implique l'ajout d'une commande de base. Finalement la *figure 3.3* permet de replacer la structure de contrôle dans son contexte.

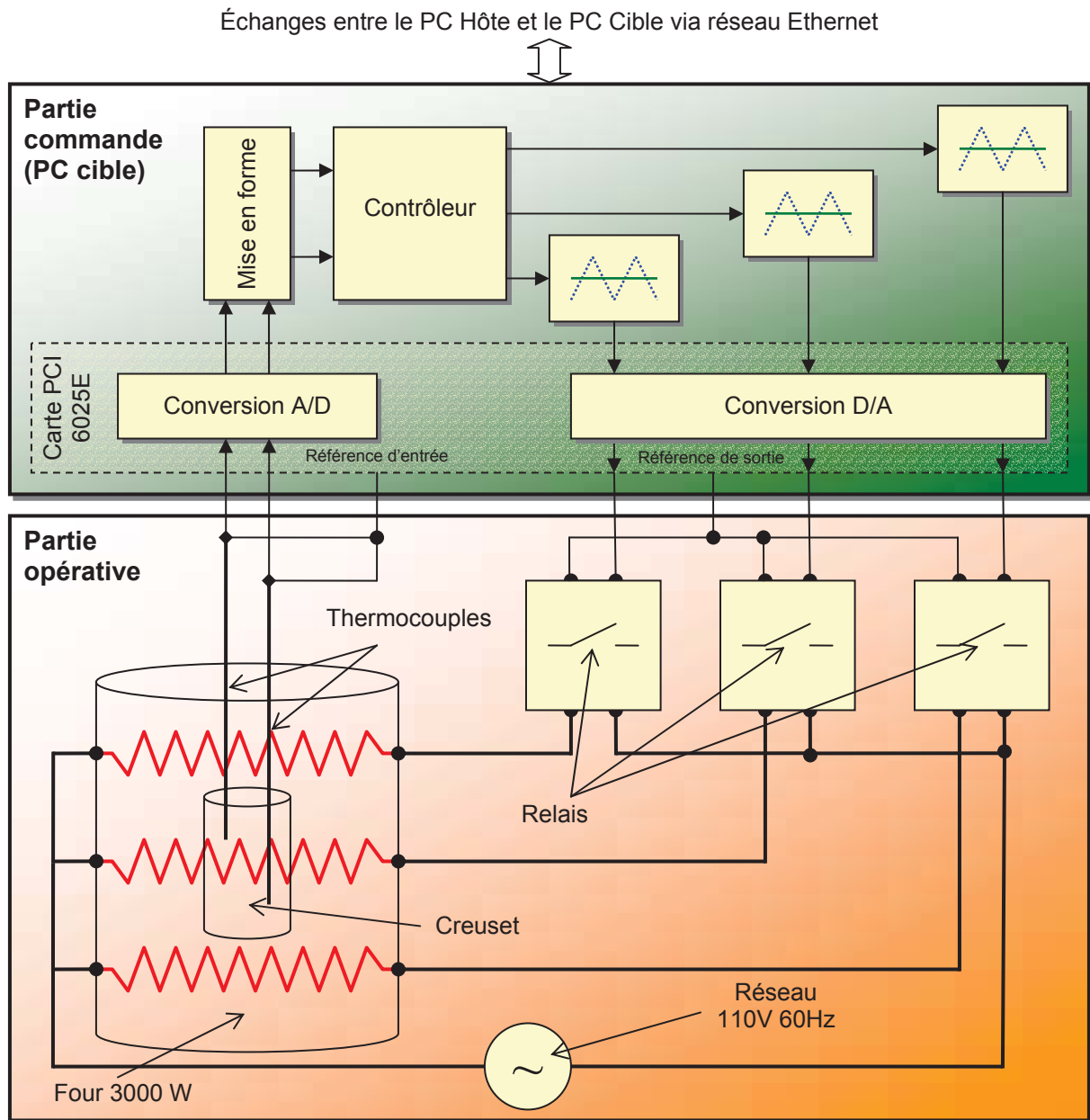


Figure 3.3 : Architecture générale du banc d'essai



### 3.3 Implantation avec xPCTarget

Le logiciel de contrôle est préalablement mis au point à l'aide des fonctionnalités classiques de Matlab Simulink. Ainsi, l'environnement graphique propre à Simulink permet de constituer facilement un module de régulation venant s'interfacer au four via les fonctions offertes par la toolbox xPC Target de Matlab. La *figure 3.4* représente le premier niveau du module mis en place pour le contrôle du four et utilisant les fonctionnalités offertes par xPC Target. On retrouve ainsi, tout d'abord, la présence du contrôleur au sein duquel est implanté la structure du contrôle en température élaborée. On distingue ensuite la modulation de largeur d'impulsion permettant la linéarisation de la relation entre la sortie du contrôleur et le pourcentage de puissance appliqué au four. Enfin, la partie opérative composée des relais, des thermocouples ainsi que du four est représentée par un bloc contenant les éléments xPC Target permettant l'interface avec la carte A/D et D/A de National Instruments.

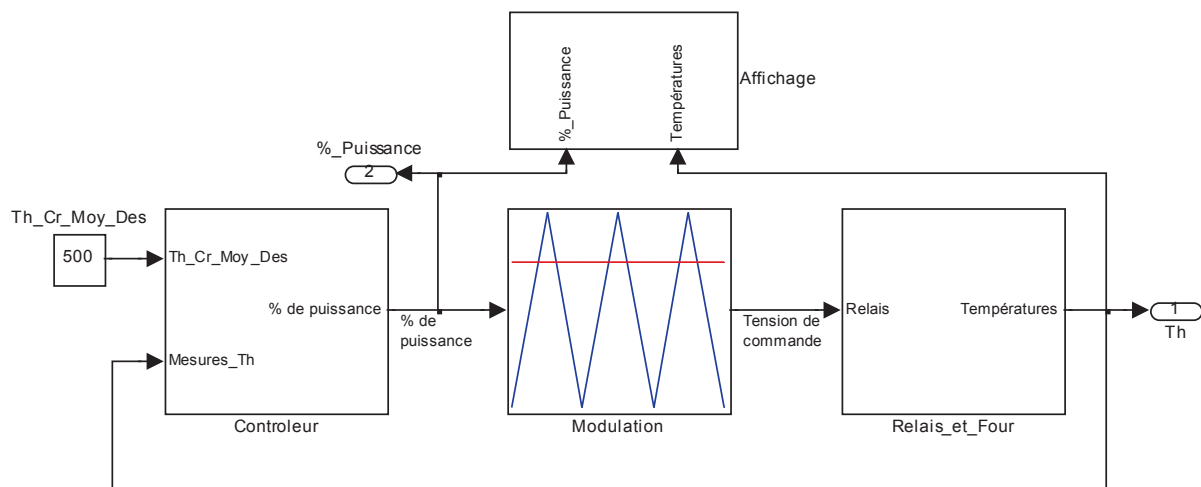


Figure 3.4 : Premier niveau du Module Simulink utilisé pour le contrôle en température

## 4 Procédure de réglage des contrôleurs

### 4.1 Point de fonctionnement

La consigne à atteindre dans l'ensemble de nos essais est de  $500^{\circ}\text{C}$ , or des essais en boucle ouverte depuis la température ambiante jusqu'à des températures d'environ  $650^{\circ}\text{C}$ , soulignent un comportement fortement non linéaire du four. Ainsi, la conception du système de régulation de la température moyenne du creuset est effectuée autour du point de fonctionnement de  $400^{\circ}\text{C}$  afin d'approximer linéairement le comportement du four sur une plage de température comprise entre  $400^{\circ}\text{C}$  et  $600^{\circ}\text{C}$ .

Des réglages manuels ont permis d'évaluer la commande de base permettant l'obtention d'une température stable aux environs de  $400^{\circ}\text{C}$ . Ainsi, pour la suite, la commande de base est prise égale à 15 % de la puissance maximale de chauffe pour les trois résistances de façon à positionner le système autour des  $400^{\circ}\text{C}$ .

### 4.2 Essai en boucle ouverte sur la température moyenne

Un essai en boucle ouverte sur la température moyenne est effectué à partir du point de fonctionnement de  $400^{\circ}\text{C}$  afin d'obtenir une identification du comportement du four en vue de sa modélisation *SISO*. Une fois le modèle du four établi, il devient possible de simuler la réponse du système avec le contrôleur mis en place pour la régulation sur la température moyenne. La simulation fournit ainsi une première approche pour le réglage des paramètres du contrôleur.

- **Protocole**

- ✓ Appliquer la puissance maximale de chauffe jusqu'à  $225^{\circ}\text{C}$
- ✓ À partir de  $225^{\circ}\text{C}$  appliquer la commande de base de 15 % de puissance
- ✓ Autour de  $400^{\circ}\text{C}$ , ajuster manuellement la puissance de façon à stabiliser la température à  $400^{\circ}\text{C}$

- ✓ Une fois stable, appliquer un échelon de commande de 35 % de puissance en plus de la base

## • Résultats expérimentaux

La *figure 4.1* présente la réponse temporelle obtenue à partir de 400°C.

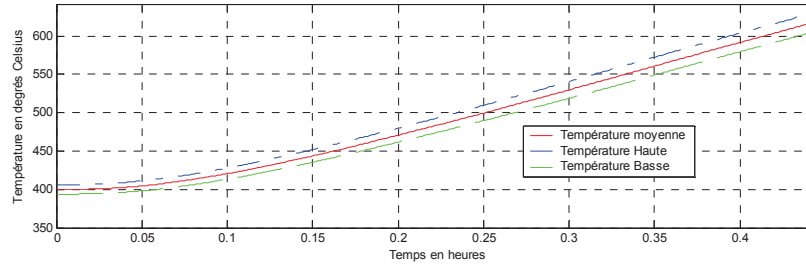


Figure 4.1: Essai en boucle ouverte sur la moyenne

## • Identification du modèle du four

On effectue une identification de la partie opérative du système en boucle ouverte en considérant un système *SISO* ayant pour entrée  $u$  le pourcentage de puissance maximale de chauffe désirée identique pour les trois résistances et pour sortie  $Th\_Cr\_Moy$  la température moyenne du creuset déterminée à partir des mesures des températures de creuset hautes et basses.

La réponse obtenue à partir de l'essai en boucle ouverte, a permis d'observer un comportement relativement linéaire dans une zone comprise entre 400°C et 650°C mais également fortement retardé. Il semble donc pertinent de modéliser le comportement entre la puissance commandée au niveau des trois résistances et la valeur moyenne de la température dans le creuset par une fonction de transfert  $T_{BO}$  du type intégrateur avec un retard pur. On note  $K$  le gain intégral et  $L$  le retard.

$$T_{BO}(s) = \frac{Th\_Cr\_Moy(s)}{u(s)} = \frac{K}{s} e^{-Ls}$$

La valeur du gain  $K$  est déterminée par linéarisation de la réponse obtenue en boucle ouverte. Ainsi, la détermination de la pente de la plage linéaire et la connaissance de la commande appliquée permettent de calculer le gain  $K$ . La valeur du retard  $L$  est ensuite obtenue par lecture graphique de l'intersection entre la plage linéaire et l'axe des abscisses. La figure 4.2 permet d'illustrer la démarche en comparant la réponse expérimentale avec la réponse simulée à partir du modèle constitué des valeurs mesurées.

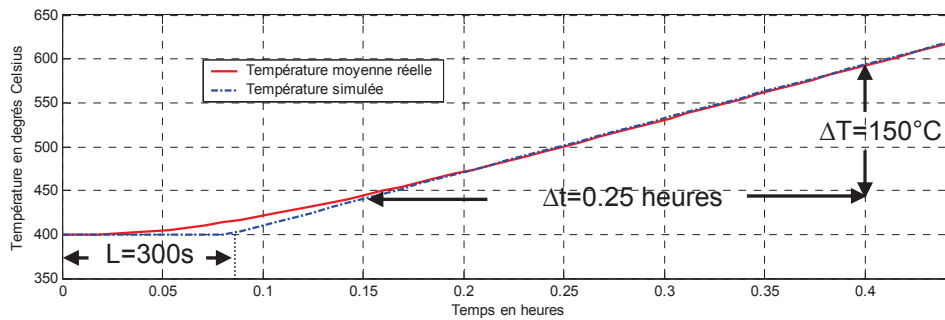


Figure 4.2: Comparaison comportement réel et modèle simulé en boucle ouverte

La lecture graphique permet d'aboutir aux résultats suivants :

$$L=300 \text{ secondes} \quad K = \frac{\Delta T / \Delta t}{\text{commande}} = \frac{0.17}{0.35} = 0.486^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1} / \% \text{puissance}$$

- **Remarque**

Le modèle simulé introduit un retard plus marqué que le système réel. On note que le système réel s'apparenterait peut-être mieux à un système du second ordre du fait de son comportement à l'origine. Néanmoins, le modèle obtenu est parfaitement satisfaisant dans le cadre de l'utilisation qui en est faite.

### 4.3 Réglage du contrôleur sur la moyenne

Le correcteur de la boucle de rétroaction sur la moyenne utilise la structure novatrice du contrôleur *PID-DL* représentée à la figure 4.3.

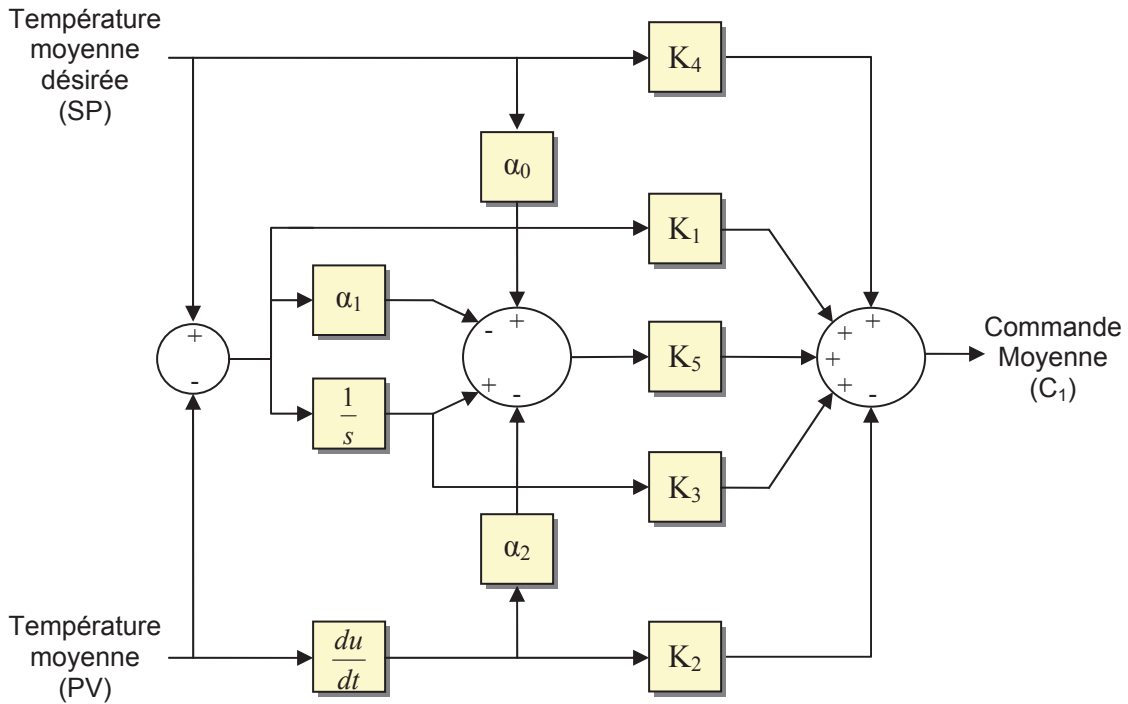


Figure 4.3 : Structure du contrôleur PID-DL

La commande générée par ce contrôleur est de la forme :

$$C_1 = u_{PID} + K_5 * \left( \alpha_0 * SP - \alpha_1 * (SP - PV) - \alpha_2 * \frac{dPV}{dt} + \int_0^t (SP - PV) dt \right)$$

$$\text{avec } u_{PID} = K_4 * SP + K_1 * (SP - PV) + K_2 * \frac{dPV}{dt} + K_3 * \int_0^t (SP - PV) dt$$

Ainsi, la boucle « Dual Loop » constituée des gains  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $K_5$  vient se superposer à l'action du correcteur *PID* anticipatif classique constitué des gains proportionnel  $K_1$ , dérivé  $K_2$ , intégral  $K_3$  et anticipatif  $K_4$ . Finalement, le correcteur obtenu

peut s'identifier au correcteur *PID* anticipatif équivalent constitué des gains  $K_1^*$ ,  $K_2^*$ ,  $K_3^*$  et  $K_4^*$  suivants.

$$\begin{aligned} K_1^* &= K_1 - \alpha_1 * K_5 & K_2^* &= K_2 - \alpha_2 * K_5 \\ K_3^* &= K_3 + K_5 & K_4^* &= K_4 + \alpha_0 * K_5 \end{aligned}$$

La procédure de réglage mise en place par DeSantis se compose des étapes suivantes :

1. Augmenter le correcteur proportionnel  $K_I$  jusqu'à obtention d'une réponse temporelle satisfaisante en terme de rapidité et de dépassement. Le modèle de simulation préalablement établi donne un point de départ pouvant être affiné par la suite. Il est également envisageable de synthétiser un contrôleur *PID* classique à l'aide d'une méthode de réglage telle que Ziegler-Nichols se fondant sur l'essai en boucle ouverte. Dans les deux cas, cette première étape du réglage ne requiert pas de nombreux essais.
2. Déterminer les paramètres  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  permettant de rapprocher avec la plus grande fidélité possible la réponse obtenue avec le correcteur proportionnel et la réponse donnée par une fonction de transfert du second ordre  $T_{approx}$ .

$$T_{approx} = \frac{1 + \alpha_0 * s}{1 + \alpha_1 * s + \alpha_2 * s^2}$$

Cette approximation est obtenue par un programme écrit sous Matlab et ayant recours à des fonctions de la toolbox System Identification [13].

3. Introduire la boucle externe avec les gains  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  ainsi déterminés, puis augmenter  $K_5$  tant que la réponse reste satisfaisante. Plus  $K_5$  sera élevé, plus le gain intégral sera important et ainsi meilleure sera la robustesse du système.

#### 4.4 Réglage du contrôleur sur l'écart

La *figure 4.4* présente la structure du correcteur proportionnel intégral *PI* utilisée pour la correction de l'écart de température entre le haut et le bas du creuset. Contrairement au réglage du contrôleur *PID-DL* sur la moyenne, aucun réglage systématique n'a été mis en place dans le cadre du contrôleur sur l'écart.

En effet, à première vue, la nature de la correction sur l'écart à superposer au contrôleur sur la moyenne, ne semblait pas pouvoir bénéficier d'une démarche systématique. Aussi, il a été adopté une procédure de réglage par essai erreur en agissant successivement sur les gains  $K_p$  et  $K_i$  du correcteur. Néanmoins, des études plus approfondies sur le sujet pourraient vraisemblablement mettre en évidence la possibilité d'appliquer une méthode plus systématique permettant le réglage de ce contrôleur.

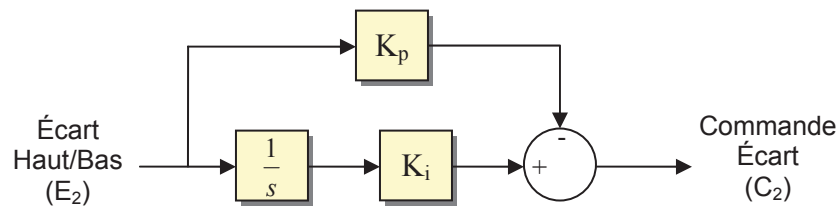


Figure 4.4 : Structure du contrôleur PI sur l'écart

## 5 Mise en oeuvre expérimentale et résultats

### 5.1 Contrôleur sur la moyenne

Tel que souligné dans le § 4.1, la procédure de réglage du contrôleur sur la température moyenne est entreprise autour du point de fonctionnement de  $400^{\circ}\text{C}$ .

- **Protocole**

- ✓ Appliquer la puissance maximale de chauffe jusqu'à  $225^{\circ}\text{C}$
- ✓ À partir de  $225^{\circ}\text{C}$  appliquer la commande de base de 15 % de puissance
- ✓ Autour de  $400^{\circ}\text{C}$ , ajuster manuellement la puissance de façon à stabiliser la température à  $400^{\circ}\text{C}$
- ✓ Une fois stable, appliquer la régulation avec une consigne  $SP=500^{\circ}\text{C}$  en plus de la base

- **Réglage d'un contrôleur PID par la méthode de Ziegler-Nichols**

À partir des valeurs du retard  $L$  et du gain  $K$  obtenues lors de l'essai en boucle ouverte en identifiant la réponse obtenue à celle d'un intégrateur avec retard, la méthode proposée par Ziegler-Nichols [11] permet de synthétiser un correcteur de type *PID*, adapté au contrôle en boucle fermée du système étudié en boucle ouverte. Les valeurs mesurées de  $L$  et  $K$  donnent les gains *PID* suivants.

$$K_1 = \frac{1.2}{D * K} = \frac{1.2}{300 * 0.486} = 0.0082 \quad K_2 = 0.5 * D = 0.5 * 300 = 150$$

$$K_3 = \frac{0.5}{D} = \frac{0.5}{300} = 1.7 \cdot 10^{-3}$$

Néanmoins, ce réglage provoquant une très forte saturation de la commande en particulier du fait de la valeur importante du terme intégral, il n'a pas semblé intéressant de retenir ce type de gains dans le cadre d'une application présentant des contraintes importantes en termes de saturation de la commande.



- **Réglage du contrôleur proportionnel**

Tel que le souligne la *figure 5.1*, l'utilisation du blockset NCD de Matlab [12] permet de déterminer par optimisation paramétrique le gain du correcteur proportionnel  $K_I$  à imposer de façon à satisfaire au mieux les contraintes imposées sur la réponse à un échelon. On note que la valeur de  $K_I$  est limitée à  $0,01$  pour ne pas saturer la commande lorsque l'écart est à son maximum avec  $500-400 = 100^\circ\text{C}$  au démarrage.

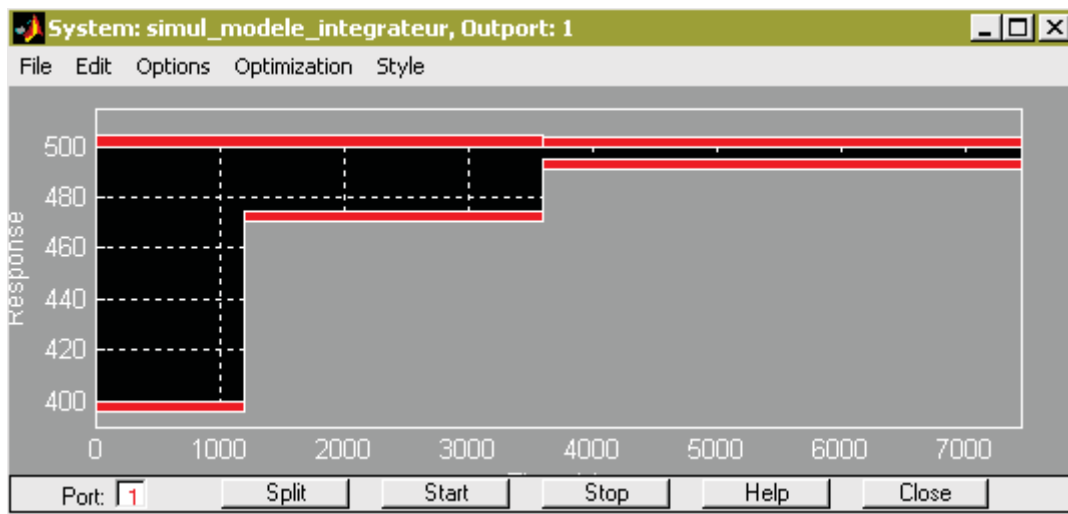


Figure 5.1: Contraintes imposées sur la réponse à l'échelon à l'aide du bloc NCD

Pour les contraintes spécifiées, le programme d'optimisation paramétrique donne  $K_I=0,0025$ . La réponse simulée correspondante est présentée sur la *figure 5.2* conjointement au comportement expérimental du système réel en boucle fermée. avec le contrôleur proportionnel  $K_I=0.0025$  déterminé précédemment.

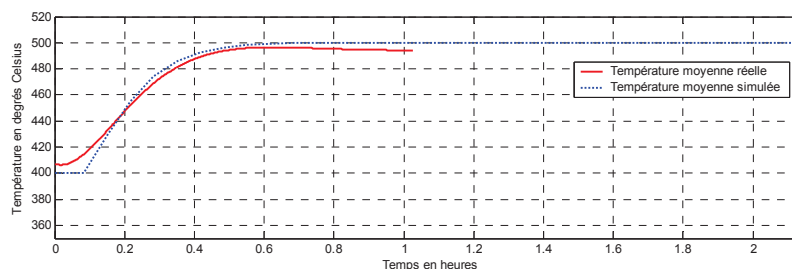


Figure 5.2: Comparaison réponse réelle et simulée avec  $K_I=0.0025$

Contrairement à la simulation, on retrouve expérimentalement une erreur statique non nulle montrant la limite de validité du modèle mis en place. Il est donc choisi d'essayer de diminuer cette erreur en augmentant le gain proportionnel  $K_I$  sans pour autant trop détériorer la réponse. On opte finalement pour la valeur  $K_I=0.004$ . La *figure 5.3* présente les réponses comparées de l'essai expérimental et de la simulation.

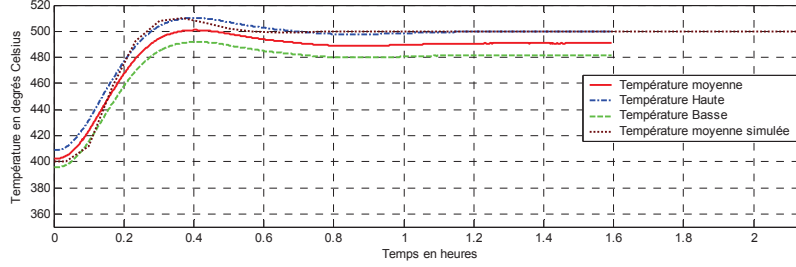


Figure 5.3: Comparaison réponse réelle et simulée avec  $K_I=0.004$

Le gain  $K_I=0.004$  retenu pour la suite offre une réponse temporelle présentant un léger dépassement de la consigne. Néanmoins, ce comportement reste satisfaisant car il offre un bon compromis entre le dépassement et l'erreur de position.

- **Approximation du second ordre**

Le programme Matlab utilisé, optimise les paramètres de la représentation de  $T_{approx}$  dans l'espace d'état de façon à faire coïncider au mieux sa réponse avec celle obtenue expérimentalement avec le gain proportionnel. La représentation dans l'espace d'état utilisée pour  $T_{approx}$  est donnée ci-après. Cette représentation est définie sous Matlab à l'aide de la fonction `idgrey`, issue de la toolbox System Identification [13].

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{\alpha_2} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_{stat}}{\alpha_2} \end{bmatrix} u$$

$$Y = [1 \quad \alpha_0] X$$

L'algorithme d'optimisation paramétrique calcule la valeur des paramètres du modèle défini dans l'espace d'état de façon à ce que son comportement coïncide au

mieux avec celui de l'essai expérimental. Cette procédure se base sur le calcul de l'estimé de l'erreur de prédiction d'un modèle linéaire.

Pour obtenir une bonne convergence de l'algorithme d'optimisation, il est nécessaire de l'initialiser avec des valeurs des paramètres adéquates. Ainsi, les valeurs initiales des paramètres sont obtenues de façon approximative par lecture graphique à partir de l'amplitude du premier dépassement en pourcent  $D_{1\%}$  ainsi que de l'instant du premier dépassement  $t_{pic}$ .

$$D_{1\%} = 10 \% \quad t_{pic} = 1445 \text{ s}$$

On a les relations classiques suivantes dans le cas d'un système du second ordre.

$$\xi = \sqrt{\frac{\ln(\frac{D_{1\%}}{100})^2 - 1}{\ln(\frac{D_{1\%}}{100})^2 + \pi^2}} = 0,6 \quad \text{et} \quad \omega_n = \frac{\pi}{t_{pic} \sqrt{1 - \xi^2}} = 0,0027 \text{ rad.s}^{-1}$$

Cette démarche permet d'aboutir aux valeurs initiales  $\alpha_{10}$  et  $\alpha_{20}$  ci-dessous.

$$\alpha_{10} = \frac{2\xi}{\omega_n} = 444,4 \quad \alpha_{20} = \frac{1}{\omega_n^2} = 1,37.10^5$$

La valeur de  $\alpha_0$  permet de rendre compte du retard du système en faisant apparaître un système à non minimum de phase. En effet, le développement au premier ordre de l'expression du retard  $e^{-Ls} \approx 1 - Ls$ , où  $L$  représente la valeur du retard en secondes, permet de retrouver au signe près le numérateur de  $T_{approx}$ . Ainsi, la valeur initiale  $\alpha_{00}$  est obtenue par identification avec la valeur du retard déterminée lors de l'essai en boucle ouverte, d'où  $\alpha_{00} = -300$ . La valeur initiale de  $K_{stat}$  est quant à elle déterminée à partir du calcul de la moyenne du rapport entre la sortie et l'entrée en régime permanent.

Finalement, le programme donne les valeurs suivantes aux paramètres de l'approximation du second ordre.

$$K_{stat} = 0,98 \quad \alpha_0 = -41 \quad \alpha_1 = 418 \quad \alpha_2 = 1,42 \cdot 10^5$$

La réponse du modèle ainsi approximé est comparée à la courbe réelle sur la *figure 5.4*.

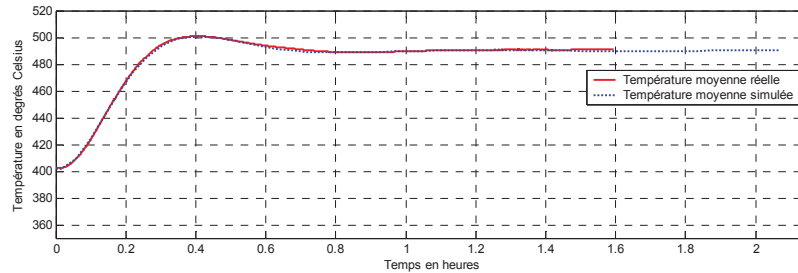


Figure 5.4: Comparaison de la réponse du modèle et de la réponse réelle

- **Introduction de la boucle Dual Loop : réglage de  $K_5$**

Les valeurs de  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont réglées à partir de l'approximation du second ordre effectuée précédemment. La boucle « Dual Loop » est ensuite ajoutée au contrôleur proportionnel  $K_I=0.004$ , en introduisant un gain  $K_5$ . Plusieurs essais en augmentant  $K_5$  permettent de déterminer la valeur limite maximale de  $K_5$  avant détérioration de la réponse. La *figure 5.5* présentant une superposition des résultats obtenus pour les différentes valeurs de  $K_5$  entreprises est associée à la *figure 5.6* présentant les mêmes réponses mais simulées grâce au modèle établi.

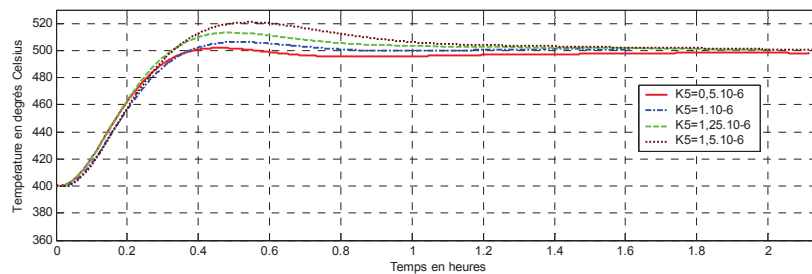


Figure 5.5 : Comparaison du comportement expérimental de la moyenne en fonction de  $K_5$

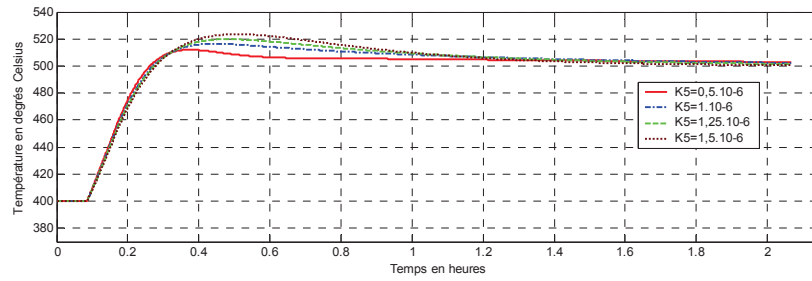


Figure 5.6: Comparaison du comportement simulé de la moyenne en fonction de  $K_5$

On constate, tant au niveau expérimental qu'en simulation, qu'à mesure que  $K_5$  augmente, la réponse du système se détériore au regard du régime transitoire. En effet, l'amplitude du premier dépassement augmente et le système met par conséquent plus de temps à se stabiliser autour de la consigne. Néanmoins, plus le gain  $K_5$  est élevé plus l'effet de l'intégrale du contrôleur est important et ainsi la robustesse améliorée. Il importe donc d'opter pour un compromis permettant d'allier une bonne robustesse avec un régime transitoire satisfaisant en terme de dépassement et de temps de réponse. Le gain  $K_5=1.10^{-6}$  offrant un bon compromis en terme de rapidité et de robustesse, il a été choisi de le conserver pour la suite.

Les détails de chaque essai et de la simulation associée sont présentés sur les figures 5.7 à 5.10.

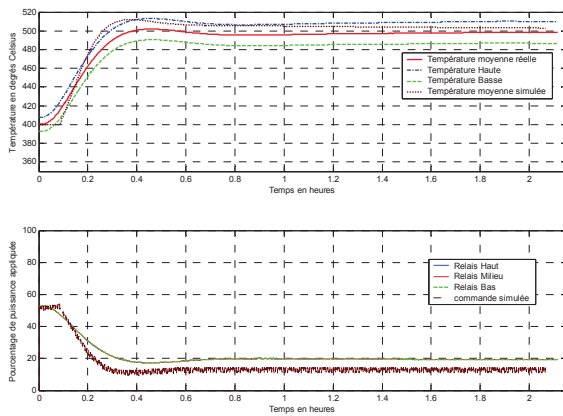


Figure 5.7 : Essai en boucle fermée avec  $K_5=0,5.10^{-6}$

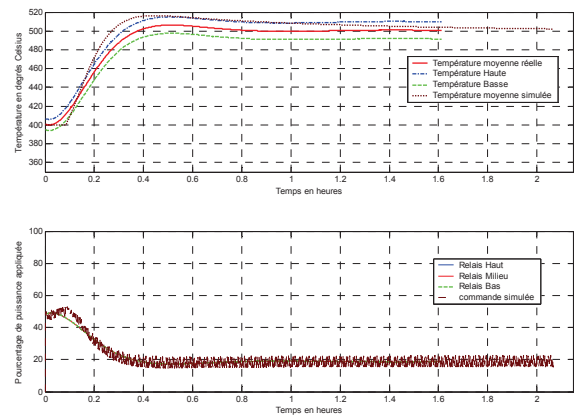


Figure 5.8 : Essai en boucle fermée avec  $K_5=1.10^{-6}$

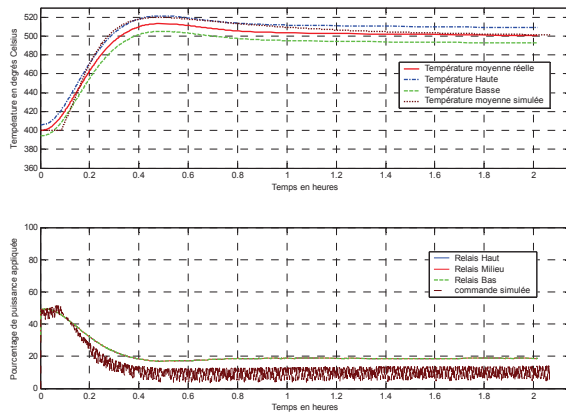


Figure 5.9 : Essai en boucle fermée avec  $K_5=1,25.10^{-6}$

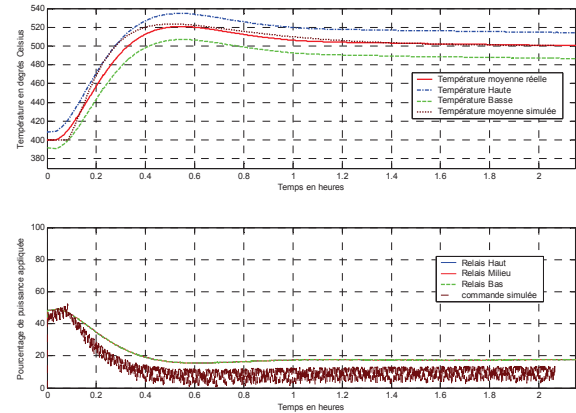


Figure 5.10 : Essai en boucle fermée avec  $K_5=1,5.10^{-6}$

Les simulations obtenues donnent des résultats fiables vis-à-vis du comportement global du système, en particulier quant à l'influence du gain  $K_5$ . Néanmoins, les écarts non négligeables avec la réalité justifient la conduite d'essais expérimentaux.

### • Essai du contrôleur sur la moyenne en mode opératoire normal

Lors de la procédure de réglage du contrôleur sur la moyenne, le système était positionné autour du point de fonctionnement de  $400^{\circ}\text{C}$ . Ainsi, avant la mise en route de la régulation, il fallait attendre que la température se stabilise autour de ce point. Lors d'une utilisation normale du dispositif de contrôle en température du four, l'utilisateur ne devrait pas être contraint d'attendre que le système se stabilise pour enclencher la régulation. Il importe donc de vérifier la validité du contrôleur mis en place dans le cadre d'une utilisation normale. Le protocole suivant présente le mode opératoire normal.

- ✓ Appliquer la puissance maximale de chauffe jusqu'à  $300^{\circ}\text{C}$
- ✓ À partir de  $300^{\circ}\text{C}$ , appliquer la commande de base de 15 % de puissance
- ✓ À partir de  $400^{\circ}\text{C}$ , appliquer, en plus de la base, la régulation avec une consigne  $SP=500^{\circ}\text{C}$  et le gain  $K_5=1.10^{-6}$  déterminé précédemment

La figure 5.11 présente la réponse obtenue en mode opératoire normal. On vérifie ainsi que le comportement du système en mode opératoire normal concorde bien avec

celui obtenu autour du point de fonctionnement. Ces résultats confortent donc la validité de la démarche de conception entreprise.

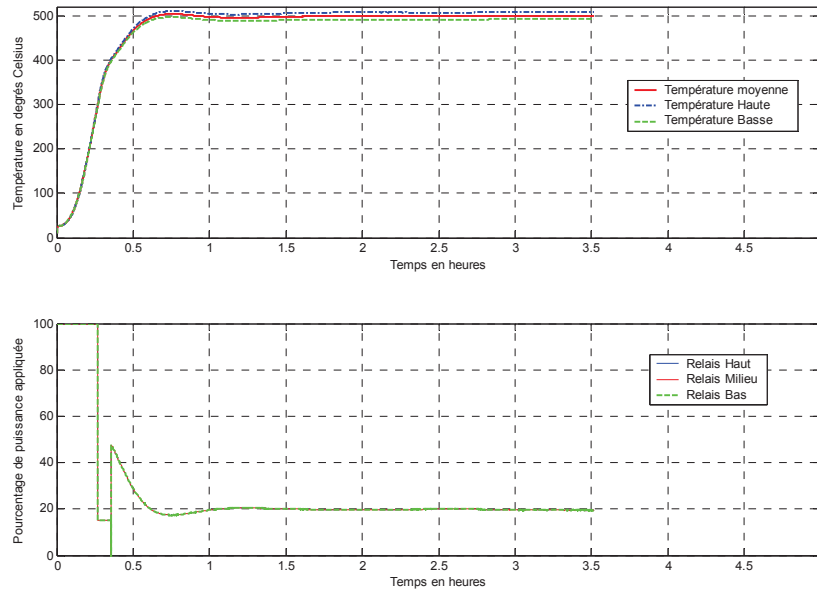


Figure 5.11: Essai du contrôleur sur la moyenne en mode opératoire normal

Néanmoins, tel que le souligne la figure 5.12, on constate, lors de la montée en température, l'apparition d'un écart non négligeable de l'ordre de  $15^{\circ}\text{C}$  entre les températures du haut et du bas. De plus, cet écart tend à se stabiliser autour d'une valeur non nulle en régime permanent.

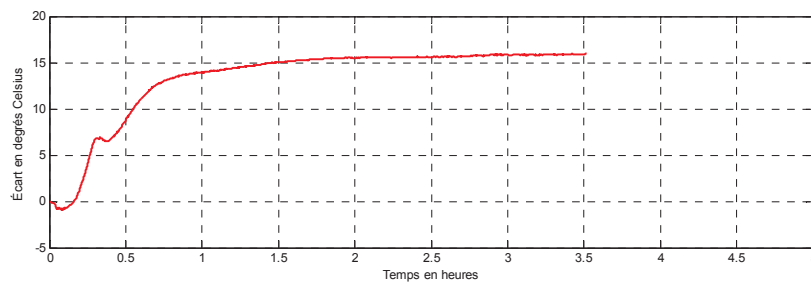


Figure 5.12 : Écart entre les températures hautes et basses en mode opératoire normal

La pertinence d'une correction sur l'écart est ainsi parfaitement justifiée dans la mesure où il ne serait pas acceptable d'entreprendre une expérience avec une différence de température de l'ordre de  $15^{\circ}\text{C}$  entre le haut et le bas du creuset.

## 5.2 Contrôleur sur l'écart

De même que lors de l'essai précédent, les essais sur le contrôleur sur l'écart sont entrepris dans le cadre d'un mode opératoire normal.

- **Protocole**

- ✓ Appliquer la régulation sur l'écart à partir de la température ambiante
- ✓ Appliquer la puissance maximale de chauffe jusqu'à  $300^{\circ}\text{C}$
- ✓ À partir de  $300^{\circ}\text{C}$ , appliquer la commande de base de 15 % de puissance
- ✓ À partir de  $400^{\circ}\text{C}$ , appliquer, en plus de la base, la régulation avec une consigne  $SP=500^{\circ}\text{C}$  et le gain  $K_5=1.10^{-6}$  déterminé précédemment

- **Réglage du correcteur PI**

La procédure de réglage par essai erreur présentée au § 4.4 permet d'aboutir aux résultats expérimentaux de la figure 5.13 avec les gains  $K_p=0,05$  et  $K_i=1.10^{-5}$ .

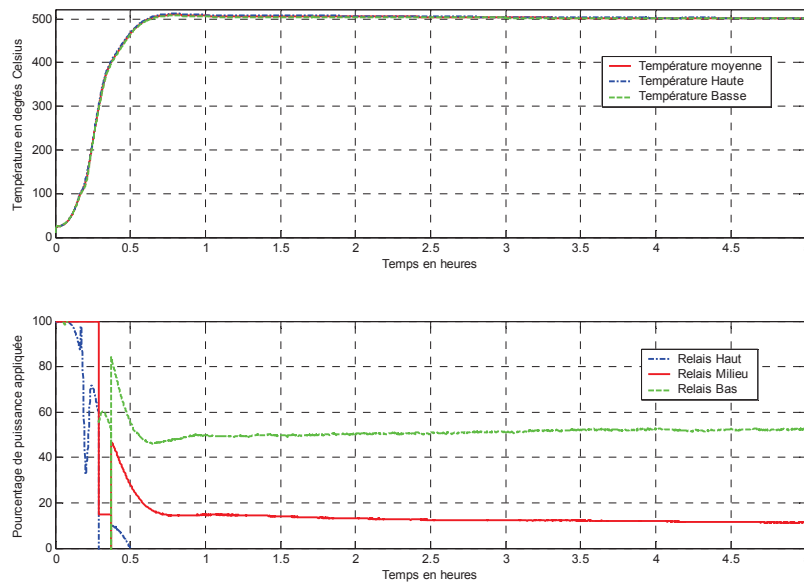


Figure 5.13 : Essai du correcteur PI sur l'écart de température ( $K_p=0,05$  et  $K_i=1.10^{-5}$ )

Le réglage des gains du correcteur PI sur l'écart de température pourrait vraisemblablement être affiné mais on note néanmoins sur la figure 5.14 l'amélioration



marquée du comportement de l'écart de température qui tend à se stabiliser autour d'une valeur nulle.

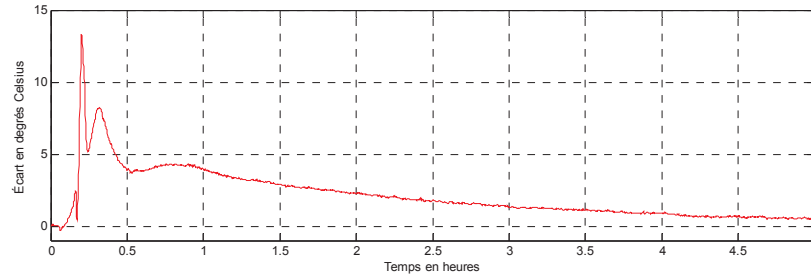


Figure 5.14 : Écart entre les températures hautes et basses après correction sur l'écart

On remarque cependant que la superposition de la correction sur l'écart à la correction sur la moyenne entraîne une dégradation de la stabilisation de la température moyenne. En effet, on constate qu'après le premier dépassement, le système met beaucoup plus de temps à se stabiliser que lors des essais avec le contrôleur sur la moyenne seul. Il semble en effet apparaître un problème de cohabitation entre les deux dynamiques introduites par les correcteurs. Ainsi, à proximité de la consigne de  $500^{\circ}\text{C}$ , le contrôleur sur l'écart tend à maintenir la température à son état actuel alors que le contrôleur sur la moyenne voudrait la positionner plus précisément au niveau de la consigne. Au regard de la prépondérance des gains choisis pour la correction sur l'écart, l'action du contrôleur sur la moyenne ne semble pas assez forte. Un réglage plus fin des gains du *PI* sur l'écart pourrait sans doute permettre de palier au conflit entre les deux modes de correction.

## **Conclusion**

La procédure de réglage du PID Dual Loop récemment mise au point au sein de notre section Automation et Systèmes a été implantée sur un banc d'essai constitué d'un four cylindrique à trois zones de chauffe et caractérisé par sa dynamique présentant un retard important. Le problème considéré est le contrôle de la température moyenne du creuset situé au cœur du four.

Les résultats obtenus lors des essais expérimentaux et par simulation, ont permis de valider la pertinence de cette procédure de réglage dans le cadre spécifique d'un système présentant un retard important. Elle a également permis de confirmer l'aspect systématique de la méthode pour le réglage de la température moyenne du creuset.

Une température homogène au sein du creuset a pu être atteinte au prix d'une légère dégradation de la dynamique générale du système. Ainsi, le banc d'essai réalisé a permis de valider la structure générale du contrôle en température mise en place.

## Bibliographie

1. De Santis, R.M., Dual Loop PID Configuration for Process Control, EPM/RT/94/04, Rapport Technique de l'Ecole Polytechnique de Montréal, (Automne 1994; 40 pages).
2. De Santis, R.M., 1996, Dual Loop PID Configuration, **United States Patent Office**, patent N. 5481453.
3. De Santis, R.M., 2000, PID Dual Loop Control for Industrial Processes, **Past Present and Future of PID Control** IFAC PID'00 Workshop, Terrassa, April 2000, pp.453-458.
4. Cornieles, E., Bougeret, C., DeSantis, R.M., O'Shea, J., 1997a, Développement d'un Module de Réglage Automatique du Régulateur PID Dual Loop, École Polytechnique de Montréal, EPM/RT-97/24.
5. Cornieles, E., Bougeret, C., DeSantis, R.M., O'Shea, J., 1997b, Comparaison Expérimentale de Différentes Techniques de Réglage du Régulateur PID et PID Dual Loop, Ecole Polytechnique de Montréal, EPM/RT-97/19.
6. Anonymous, National Instruments Corporation, **DAQ 6023E/6024E/6025E User Manual**, December 2000.
7. Anonymous, National Instruments Corporation, **Calibration Procedure E Series**, Version 2.0, February 2000.
8. Anonymous, Mathworks, **xPC Target User's Guide**, Version 2, July 2002,
9. Anonymous, Mathworks, **Getting Started with xPC Target**, Version 2, July 2002.
10. Anonymous, OMEGA, **Practical Temperature Measurements**, The Temperature Handbook, vol29, pp Z12-Z24, 1995.
11. Astrom, K.J., Hagglund, T., 1988, **Automatic Tuning of PID Controllers**, ISA.
12. Anonymous, Mathworks, **Nonlinear Control Design Blockset**, Version 1, July 2002.
13. Anonymous Mathworks, **System Identification Toolbox**, Version 5, July 2002.



**L'École Polytechnique se spécialise dans la formation d'ingénieurs et la recherche en ingénierie depuis 1873**



**École Polytechnique de Montréal**

**École affiliée à l'Université  
de Montréal**

Campus de l'Université de Montréal  
C.P. 6079, succ. Centre-ville  
Montréal (Québec)  
Canada H3C 3A7

[www.polymtl.ca](http://www.polymtl.ca)

